

論文 ポリエステル製繊維シートによる補強鉄筋コンクリート柱のせん断強度に対する接着剤強度の効果

荻野 亮*1・壁谷澤 寿海*2・五十嵐 俊一*3

要旨：鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐震補強にポリエステル製繊維シートを用いる方法は、すでに十分な実験研究によってその補強効果が検証されており、建築あるいは橋梁のRC柱を主な対象にして多くの既存構造物の耐震補強工法として実用化されている。今回の実験ではシートを巻き付ける際に使用する接着剤の強度を増大した場合の補強効果を検証する目的で柱の実験を行った。補強された柱の実験による最大せん断耐力は、実用設計で用いられてきた接着剤の強度(剥離エネルギー)を考慮したせん断耐力式において限界剥離耐力を修正することで従来の補強効果と同様に評価しうることが確認された。

キーワード：ポリエステル製繊維シート、耐震補強、せん断耐力、接着剤、剥離エネルギー

1. はじめに

耐震性能が不足している既存鉄筋コンクリート構造物では、柱のせん断補強筋が不十分であることから地震時に脆性的な破壊が生じて水平力による柱の破壊とほぼ同時に柱が鉛直荷重支持能力を失い、建物全体または一部が倒壊に至る被害が生じる可能性がある。このような倒壊現象を防止するための補強方法として、柱にポリエステル製繊維シート(以下、シート、SRFと略称する)を巻きつける方法(以下、シート補強、SRF補強と略称する)が提案され、柱の軸力支持能力が飛躍的に改善されることが実験的に実証されており¹⁾⁴⁾、この十数年間に多くの建物や橋梁に実用化されてきた。

本研究では、シートを巻き付ける際に用いる接着剤の強度を現状で使用されている接着剤よりも増大した場合の補強効果を検証することを目的として、新たに柱の実験を行い、接着剤の改良によるせん断耐力の増大の効果を検証した。また、ほぼ同等の帯筋によって補強したRC柱の耐力、靱性とも比較している。今回の実験結果による耐力増分は、従来から用いてきた剥離耐力を考慮した実用せん断耐力式の限界剥離耐力を修正したものであり、実験値を計算値と比較してせん断耐力評価法の妥当性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は帯筋補強試験体1体、SRF補強用試験体3体の計4体である。試験体一覧を表-1に、柱断面を図-1に、配筋図を図-2に示す。主な諸元である試験体の断面形状、内法高さ(mm)、主筋比(p_t)、せん断補強筋比

(p_w)の計画は、実用設計式にもとづき、シート補強後の曲げ強度がせん断強度を十分に上回るような主筋量、シートの補強量を選択した。補強試験体の破壊モードはせん断破壊先行型になるように想定した。

2.2 材料特性

コンクリートは、設計基準強度24MPaの普通コンクリートを使用した。表-2に示したように、本実験では呼び強度24MPaのコンクリートが用いられ、材齢31日に圧縮強度試験を行った結果、平均強度は29.1MPaであった。鉄筋は、主筋にD22(SD390)を、せん断補強筋にD6(SD345)を用いた。材料強度試験による鉄筋引張試験結果を表-3に示す。

補強工法として補強材に使用したシートは、ベルト状のポリエステル製繊維シートである。シートの材料特性を表-4に示す。なお、有効ヤング率は1.0%歪み時の強度から計算している。補強に有効な応力度レベルは1.0%程度の歪みに対応するが、破断強度はその10倍以上であり、破断までに十分な余裕度をもつ点がこの補強方法の特徴になっている。今回使用した補強シートは、幅50mm、厚さ4mmであるが、必要補強量に応じて1層~4層程度重ねて使用する。

2.3 補強概要

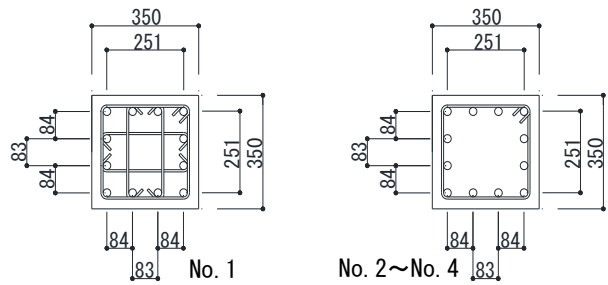
試験体No.1はシート補強の効果が帯筋による補強効果と概ね等価な補強に相当する帯筋量を意図して設計した帯筋補強試験体である。シート補強した試験体はNo.2~No.4の3体で、シートの合計厚さ(層数)は16mm(4層)、8mm(2層)、16mm(4層)とした。シートは螺旋状に柱に巻き付ける補強方法で、その際コンクリートとシートあるいはシート間の接着にウレタン系の接着

*1 東京大学大学院 工学系研究科大学院生 (正会員)

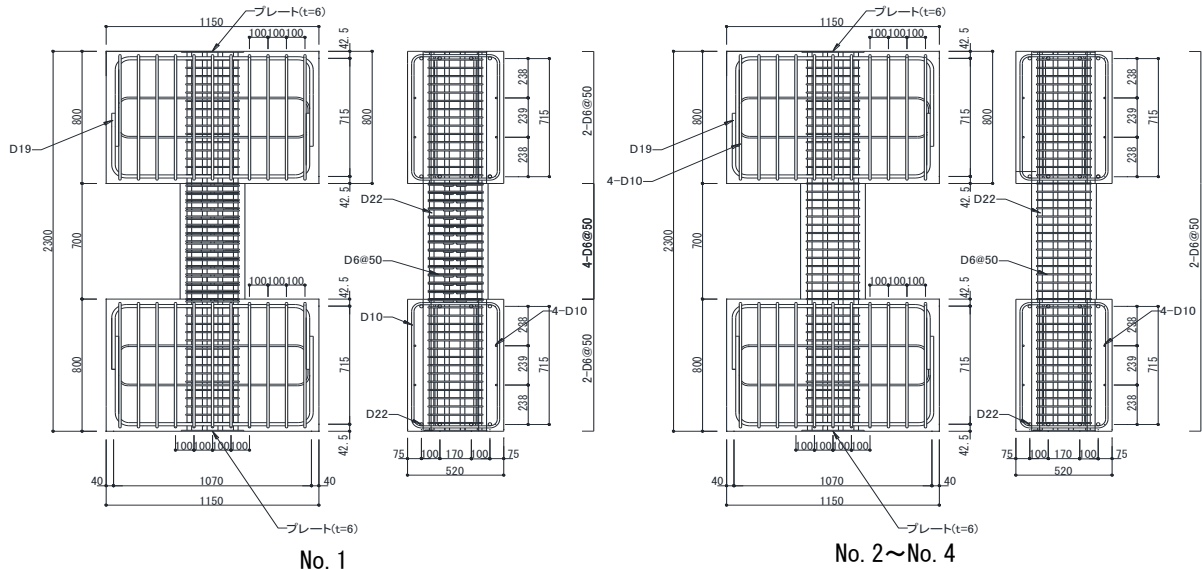
*2 東京大学 地震研究所教授 工博 (正会員)

*3 構造品質保証研究所株式会社 工博 (正会員)

剤を用いる。今回の実験では No.2 に従来から用いられてきた SRF20 を使用した。この他に、限界剥離エネルギーがほぼ 2 倍に相当する SRF40 を試験体 No.3 および No.4 に用いた。せん断引張試験による平均せん断強度と限界剥離エネルギーを表―5 に示した。No.3 はシート補強量を接着剤の強度で補った場合であり、No.4 は同じシート補強量に対して接着剤の効果が検証されるように計画した。



図―1 柱の水平断面



図―2 試験体配筋図

表―1 試験体一覧

試験体	B×D (mm)	H (mm)	Fc (MPa)	主筋	pt (%)	帯筋(柱)	pw (%)	定軸力	補強方法
No.1	350×350	700	29.1	16-D22 SD390	1.58	4-D6@50 SD345	0.87	0.25bDFc	無補強
No.2			29.1			2-D6@50 SD345	0.36		SRF20(t=16mm)
No.3			29.4						SRF40(t=8mm)
No.4			29.7						SRF40(t=16mm)

B×D: 幅×せい, H: 内法スパン, pt: 引張鉄筋比, pw: せん断補強筋比

表―2 コンクリート圧縮試験結果

	呼び強度 (MPa)	ヤング係数 (×10 ⁴ MPa)	最大荷重 (kN)	平均強度 (MPa)	最大荷重時歪 (%)
NO.1～NO.4	24	2.86	229	29.10	0.1777

表―5 接着剤強度

工法	平均接着強度 τ _f (N/mm ²)	剥離エネルギー G _f (N/mm ²)
SRF20	1.500	1.100
SRF40	2.217	2.416

表―3 鉄筋引張試験結果

	鉄筋種	ヤング係数 (×10 ⁵ MPa)	降伏強度 (MPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断歪 (%)
主筋	D22(SD390)	1.90	447	0.24	631	17
せん断補強筋	D6(SD345)	1.83	375	0.20	510	15.5

表―4 シートの材料特性

厚さ t(mm)	幅 (mm)	破断時引張強度 (kN)	引張強度時の歪 (%)	1%歪時引張強さ (kN)	有効ヤング率 E _f (MPa)
4.0	50.0	95.0	12.5	9.78	4889.0

2.4 加力方法

柱試験体の加力は、図-3 に示す加力装置を用いて、鉛直ジャッキにより定軸力（軸力比 0.25）を維持しつつ、ジャッキの傾斜角を考慮して常に反曲点が柱の中央高さ、かつ上の梁が水平になるように補正して両側の軸力と曲げせん断力を加えた。加力履歴は各試験体、部材変形角 R を、 $\pm 1/400$, $\pm 1/300$, $\pm 1/250$, $\pm 1/200$, $\pm 1/150$, $\pm 1/100$, $\pm 1/67$, $\pm 1/50$, $\pm 1/33$, $\pm 1/25$, $\pm 1/15$, $\pm 1/10$ rad. で繰り返し制御をする計画とした。ただし、試験体 No.2, No.3 では、破壊の進行により一部のレベルで制御が困難であったため、計画とは異なる加力履歴になっている。変位は全体の水平変位、鉛直変位を計測し、また、歪みは主筋、帯筋のほか、補強シートの歪みを柱脚から、50mm, 150mm, 250mm, 350mm の位置で計測した。

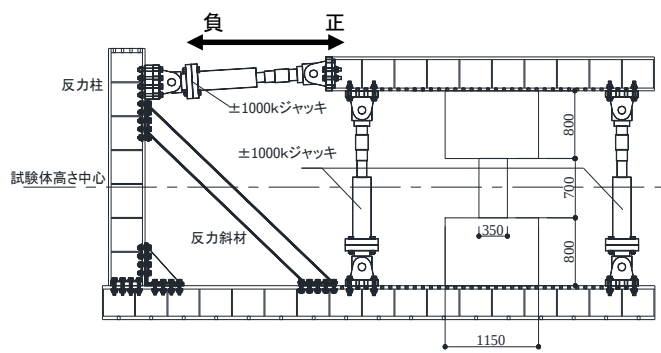


図-3 加力装置図

3. 実験結果

3.1 破壊経過

試験体の最終破壊状況を写真-1 に示す。帯筋補強試験体である No.1 試験体は、 $\pm 1/400$ rad.において、0.04～0.1mm の範囲の曲げひび割れ、せん断ひび割れが生じた。 $+1/200$ rad.で測定位置が $h/2$ 付近の帯筋が降伏した。その後 $+1/100$ rad.のピークにおいて最大水平耐力に達し、0.55mm までひび割れが広がった。そしてせん断ひび割れの進展に伴い $\pm 1/66$ rad.で水平耐力が最大水平耐力の 80%以下に低下した。 $1/50$ rad.に向かう途中でせん断ひび割れが広がり、柱表面のかぶりコンクリートが剥がれ水平力を負担できなくなり载荷を終了した。

シートで補強した試験体 No.2～No.4 はシートに覆われており、ひび割れについては確認することができない。試験体 No.2 は、 $-1/300$ rad.の最大加力時に帯筋が降伏した。 $+1/100$ rad.のピークにおいて最大水平耐力に達し、 $+1/25$ rad.で水平耐力が最大水平耐力の 80%以下に低下した。試験体 No.3 は、 $+1/400$ rad.で帯筋が降伏し、 $+1/100$ rad.のピークにおいて最大水平耐力に達した。 $+1/33$ rad.で水平耐力が最大水平力の 54.8%まで低下した。試験体 No.4 は、 $+1/400$ rad.で帯筋が降伏した。 $-1/66$ rad.のピークにおいて最大水平耐力に達し、 $+1/25$ rad.で水平耐力が最大水

平耐力の 80%以下に低下した。

SRF 補強試験体はいずれも $\pm 1/50$ rad.程度まではせん断変形はするが、外見的には殆ど変化が現れない。しかし、変形が進むにつれて、柱内部のコンクリートのひび割れが開くことにより生じるシート間の隙間ができていった。

すべての試験体が定軸力に対しては軸力保持能力が失われることがない状態で最後まで水平载荷を終えた。

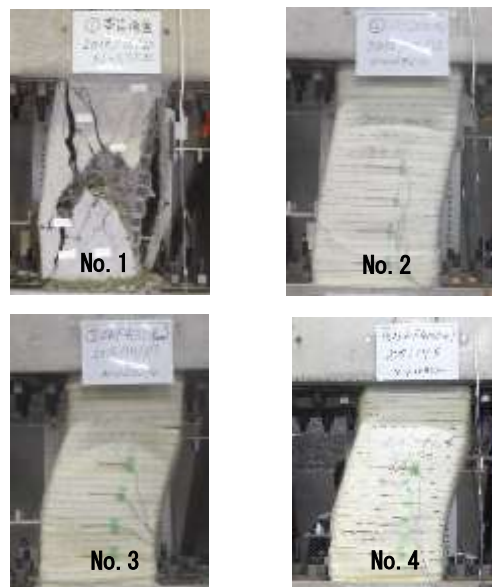


写真-1 最終破壊状況

3.2 水平力-水平変形関係

水平力-水平変位の関係を図-4 に、最大耐力の実験値を表-6 に示す。

No.1 は付着割裂破壊後、水平耐力が上昇せず変形が増大した。No.2 は No.1 に比べ水平耐力の増加を示したが、それとともに水平変位が進んだ。No.3 は、ピーク後の水平耐力が低い、減少後の耐力を維持しながら水平変位が進行した。No.4 は No.1 と比べて、水平耐力を維持しながらも、水平変位が進行した。

シート補強試験体は帯筋補強試験体に比べ最大耐力が、No.2 では 12%、No.3 では 7%、No.4 では 21%増加した。最大耐力は、No.1 が $+1/100$ rad., No.2 が $+1/100$ rad., No.3 が $+1/150$ rad., No.4 が $-1/66$ rad.において達している。No.2, No.4 は、ピーク後の耐力低下は緩やかで、シートの改善がみられる。No.3 では、ピーク後の耐力が減少するが、減少後の一定の耐力を保持した。

シート補強試験体は、大変形時に水平耐力が低下するが、この間定軸力をかけていることから、軸力保持能力は維持したままである。

補強試験体 No.4 は、水平変形が進むにつれて水平耐力が回復した。最終サイクルでは 327kN まで達した。

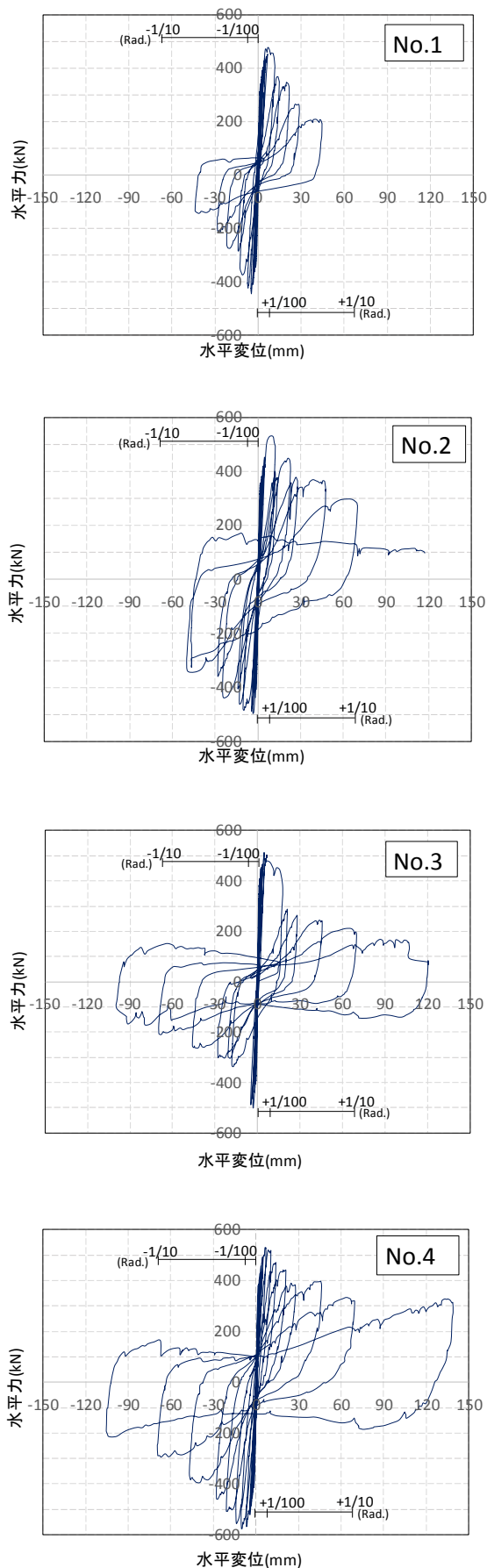


図-4 水平変位-水平力関係

表-6 試験体の最大耐力と耐力時変形角

試験体	荷重方向	最大水平耐力(kN)	最大水平耐力時の変形角(rad.)
No.1	正	476.1	0.0100
	負	-443.7	0.0066
No.2	正	529.6	0.0117
	負	-497.1	0.0049
No.3	正	512.1	0.0065
	負	-502.1	0.0045
No.4	正	528.6	0.0091
	負	-575.1	0.0141

3.3 軸方向変位

各試験体の水平変位-軸変位関係を図-5に示す。帯筋補強試験体は定軸力下において、軸歪み（軸変形の部材長に対する歪み）は常に0.6%以下であった。シート補強試験体 No.2, No.3 は $\pm 1/10 \text{ rad.}$ の大変形において、1.0%未満であり、シート補強試験体 No.4 は $-1/10 \text{ rad.}$ において軸歪みは1.2%であった。

すべての補強試験体はシート補強により、定軸力下における軸歪みは1.2%未満に防止され、大きく進行することはなかった。シート補強試験体 No.4 の軸歪みがシート補強試験体 No.2, No.3 に比べて大きいことは、今後、検討する必要がある。

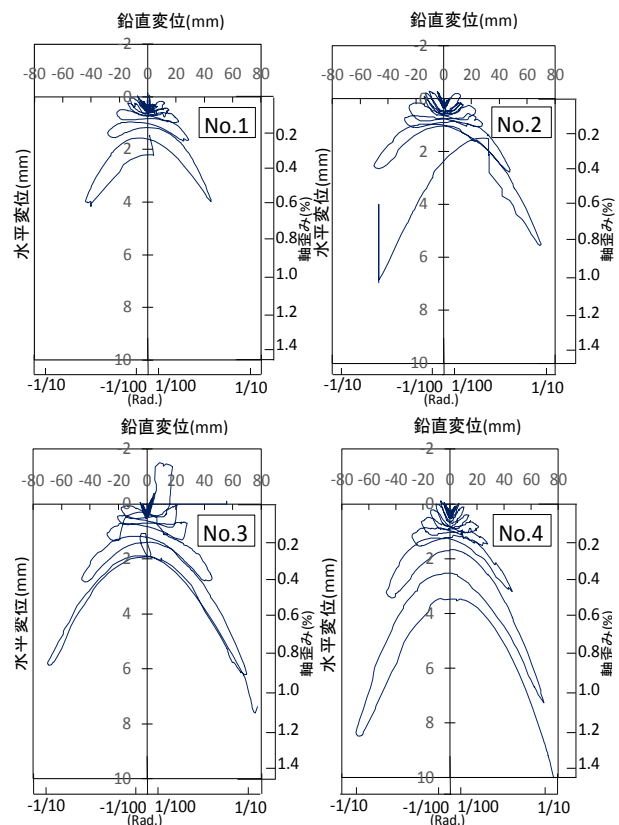


図-5 水平変位-軸方向変位関係

3.4 シート表面の歪みの計測結果

繰り返し載荷ピーク時の部材変形角とシート表面で計測された水平方向の歪みの関係を図-6に示す。No.2, No.3, No.4 の試験体ともに、シートの歪みは柱の中心になるほど大きく、柱下部になるほど共通して小さい。これは帯筋の歪みにも同様の傾向がみられた。

次節で示すようにせん断耐力の計算ではシート歪みの上限値を 1.0%としているが、図-6 では歪みはどの場合も概ねこれを下回っている。歪みレベルは No.2 に比べてシート層数の少ない No.3 ではやや大きく、4 層にした No.4 では小さい傾向になっている。この計測結果は、次節の式(3)に示すように、シートの強度発現時の応力度、すなわち、歪みがシートの厚さに反比例することに呼応している。

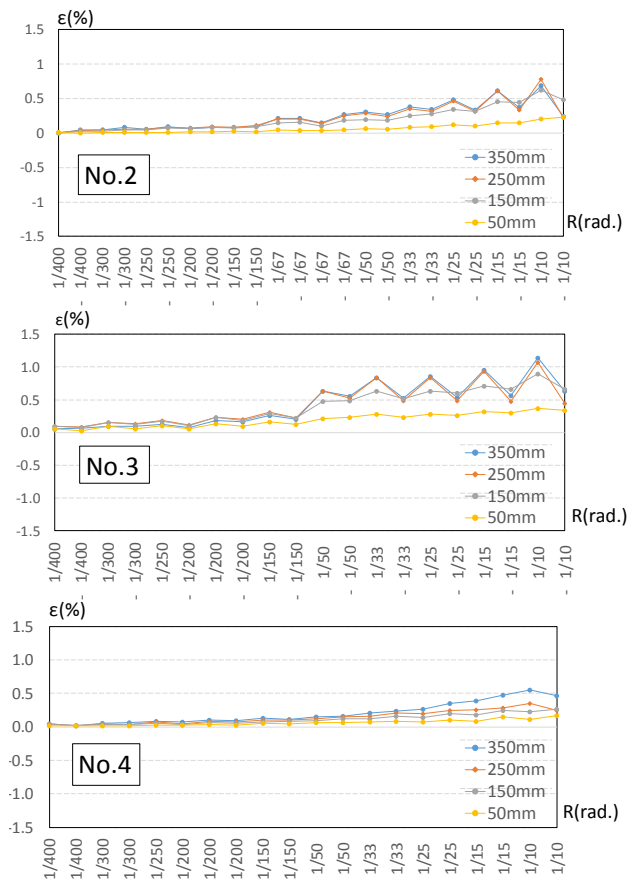


図-6 部材変形角-シートの歪みの関係

4. 実験結果の実用せん断耐力式による検討

4.1 せん断耐力評価式

SRF 工法で補強した RC 柱のせん断耐力の評価は、靱性保証型耐震設計指針⁵⁾ (以下、靱性指針) に示されたせん断耐力評価式中の鉄筋比の項にシートの強度を以下の式(1)-(3)により等価な帯筋比 p_{wef} に換算して代入する方法で計算する。なお、シートが柱を覆っていることからトラス機構の有効係数は $\lambda=1$ としている⁶⁾。

$$p_{wef} = p_{we} + \frac{2t}{b} \frac{\sigma_{fp}}{\sigma_{wy}} \quad (1)$$

$$\sigma_{fp} = \text{Min}(\sigma_{fe}, \varepsilon_{pu} E_f) \quad (2)$$

$$\sigma_{fe} = \sqrt{\frac{2G_f E_f}{t}} \quad (3)$$

ここで、 σ_{wy} , p_{we} は、せん断補強鉄筋の強度と鉄筋比、 t , E_f は、シートの厚さとヤング率、 b は柱幅である。また、 σ_{fp} はシートの強度であり、式(3)で計算される剥離限界強度 σ_{fe} とシートの上限歪み ε_{pu} (1.0%とする) に対する強度の小さい方としている (式(2))。ただし、式(3)の G_f は、接着剤の界面剥離エネルギーである。式(1), (3)より、強度が σ_{fe} で決まる場合には、 G_f が倍になればシートの厚さ t は半分で、同じ換算鉄筋比になることが導かれる。本実験の試験体 No.2 と No.3 はこれに相当する。

本実験の各ケースに対して上記の方法で計算した結果を表-7に掲げる。表中、 V_u , および V_{bu} は、主筋の付着破壊を考慮しないせん断強度と付着破壊を考慮したせん断強度であり、靱性指針に従い設計用付着応力度 τ_{fd} と付着強度 τ_{bu} の比較で、 $\tau_{fd} > \tau_{bu}$ の場合には、破壊モードを付着破壊として、せん断強度計算値 $Q_{su} = \text{Min}(V_{bu}, V_u)$ 、その他の場合には、 $Q_{su} = V_u$ としている。

4.2 計算値と実験値の比較

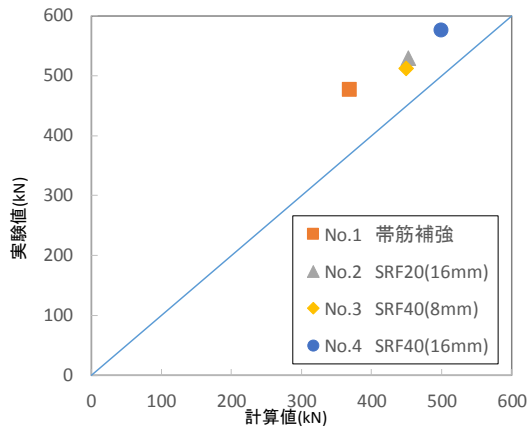
試験体の材料試験にもとづいて決定した材料強度 (表-1~表-5) を用いて、前項の方法で補強シートの量を等価な帯筋比に換算して算出した各試験体の最大せん断耐力の計算値 (Q_{su}) を表-7に示す。また、実験値を縦軸に、計算値を横軸にして最大耐力を比較した結果を図-7に示す。

試験体の計算上の破壊モードは、No.1 がせん断破壊である。No.2, No.3, No.4 は付着破壊の影響を考慮し、小さい計算値を選択する。計算値によるせん断耐力に対して表-6に示した実験による最大耐力 (正負のピーク値の大きい方) と試験結果一覧と合わせると、実験値は No.1 は正方向、負方向において 29%, 20%上昇した。SRF 補強試験体 No.2 については、正負それぞれに対して、せん断耐力が 17%, 10%, No.3 は 14%, 12%, No.4 は 6%, 15%上昇している。

No.2 に対して No.3 あるいは No.4 の実験による最大耐力の増分ないし計算値を常に上回ること是指針式における計算値による予測傾向と概ね対応しており、新しい接着剤の効果は安全側に検証されていると判断される。

表一7 セン断耐力の計算値

試験体	載荷方向	曲げ終局せん断時 せん断力 Q_{mu} (kN)	V_u (kN)	V_{bu} (kN)	破壊 モード	Q_{su} (kN)
No.1	正	830.1	369.6	444.8	せん断	369.6
	負					
No.2	正	830.1	538.8	452.9	付着破壊	452.9
	負					
No.3	正	831.2	538.5	449.8	付着破壊	449.8
	負					
No.4	正	832.4	575.8	500.5	付着破壊	500.5
	負					



図一7 耐力の実験値と計算値の比較

5. まとめ

既存鉄筋コンクリート造柱にポリエステルシートを用いる耐震補強工法において、接着剤の強度を改良した場合のせん断耐力を検証する目的で、シートで補強した柱の試験体による実験を行った。実験で得られた試験体の最大耐力と既往の実用せん断耐力式による計算値を比較した結果、せん断強度に対する補強効果に関して以下のことが明らかとなった。

- 1) 従来の接着剤を用いてシートを4層にした試験体 No.2 に対して、高強度の接着剤を用いてシートを2層に減らした試験体 No.3 は概ね同等のせん断耐力であった。
- 2) 従来の接着剤を用いたシートを4層にした試験体 No.2 に対して、高強度の接着剤を用いてシートを同じ4層にした試験体 No.4 は、概ね設計式による評価とほぼ同等の耐力増加がみられた。
- 3) いずれの場合も、耐力の計算値との比率は設計式に

よる評価法と同様の傾向にあり、接着剤の剥離エネルギーにもとづいてシート補強量を等価なせん断補強筋に置換する実用設計式の有効性とせん断耐力評価の精度が確認された。

なお、帯筋補強による試験体 No.1 とシート補強による試験体 No.2-4 のせん断抵抗メカニズムの違いに関しては、有効なコンクリート断面やせん断破壊時のせん断補強負担など、さらに詳細な分析と評価が必要である。また、接着剤の強度は大変形時の靱性改善の効果も期待できる可能性もあるが、この効果についても検証と分析が必要である。

謝辞：柱の実験は東京大学地震研究所の構造実験室で行われた。金杰（東京大学大学院生）、李禹彤、蘇子行（同研究生）の各氏には実験作業に協力を得た。

参考文献

- 1) 壁谷澤寿海、田才晃、五十嵐俊一：鉄筋コンクリート建物の崩壊防止のための経済的な耐震補強手法、安全工学シンポジウム、日本学術会議、pp.1-4, 2001.
- 2) 小泉洋、壁谷澤寿海、田才晃、五十嵐俊一：鉄筋コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, pp.937-942, 2001.
- 3) 壁谷澤寿海・金裕錫・五十嵐 俊一、鉄筋コンクリート偏心ピロティ壁フレーム構造の震動破壊実験(その 2)SRF 補強の効果、第 11 回日本地震工学シンポジウム、JAEE 264,pp. 1427-1432, 2002.
- 4) 大杉泰子・壁谷澤寿海・田才晃・五十嵐 俊一、ポリエステル製繊維シートによる鉄筋コンクリート造柱の耐震補強に関する実験的研究、第 11 回日本地震工学シンポジウム、JAEE 332, pp.1835-1840, 2002.
- 5) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、日本建築学会、pp.142-144, 1999.
- 6) 構造品質研究所：SRF 工法設計・施工指針同解説、2015.